

# CARACTERIZAÇÃO DA DINÂMICA DE FLUXO, DOS REBAIXAMENTOS E DAS RESERVAS RENOVÁVEIS DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NA REGIÃO METROPOLITANA DE FORTALEZA (RMF), CE

Rinaldo Afrânio Fernandes<sup>1</sup> & Celso de Oliveira Loureiro<sup>2</sup>

**Resumo** – Este trabalho descreve a dinâmica de fluxo, a condição do rebaixamento e as reservas renováveis das águas subterrâneas na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), em função das condições naturais do meio hidrogeológico e das condições de bombeamento expressas pela grande quantidade de poços existentes na região. Para tanto, foi concebido um modelo hidrogeológico conceitual, implementado em um código computacional, que permitiu mostrar os seguintes resultados principais: o fluxo das águas subterrâneas ocorre, preferencialmente, em direção aos leitos dos principais cursos d'água e em direção ao mar; os rebaixamentos médios podem atingir até 20 m de profundidade, sendo menos expressivos nos municípios localizados nos domínios de rochas cristalinas, onde a densidade de poços é mais baixa; a operação dos poços é capaz de produzir cerca de 95,67 milhões de m<sup>3</sup>/ano, sendo 79,79 milhões de m<sup>3</sup>/ano de águas doces e 15,88 milhões de m<sup>3</sup>/ano de águas subterrâneas provenientes da intrusão da cunha salina; a reserva renovável total calculada pelo modelo indicou um valor da ordem de 350,82 milhões de m<sup>3</sup>/ano.

**Abstract** – This work describes the flow dynamics, the condition of the drawdown and the groundwater renewable reserves in the Metropolitan Area of Fortaleza, based on the natural hydrogeologic conditions and the great amount of groundwater pumping from existent wells in the area. For this, a hydrogeologic conceptual model was conceived and implemented in a computational code, which allowed to show the following main results: the groundwater flows, preferentially, towards the beds of the main courses of superficial water and towards the sea; the average drawdown can be up to 20 meters, being less expressive in the districts located in the domains of crystalline rocks, where the density of wells is lower; the operation of the wells is capable to produce about 95,67 million m<sup>3</sup>/y, out of which, 79,79 million m<sup>3</sup>/y of fresh water and 15,88 million m<sup>3</sup>/y of groundwater coming from the intrusion of the saline waters; the total renewable reserves, calculated by the model, correspond to approximately 350,82 million m<sup>3</sup>/y.

**Palavras-chave** – Região Metropolitana de Fortaleza; Dinâmica de Fluxo; Reservas Renováveis.

---

<sup>1</sup> Ph.D., HIDROVIA-Hidrogeologia e Meio Ambiente Ltda. R. Albita, 131/306 – Cruzeiro – Belo Horizonte, MG, Brasil, CEP 30.310-160. Tel.: (31) 3225-7329 – e-mail: [rinaldo@hidrovia.com.br](mailto:rinaldo@hidrovia.com.br).

<sup>2</sup> Ph.D., Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – Escola de Engenharia – Universidade Federal de Minas Gerais, Av. do Contorno 842, 7º andar, Bairro Centro, Belo Horizonte, MG, Brasil, CEP 30.110-060, Tel.: (31) 3238-1884, e-mail: [celso@desa.ufmg.br](mailto:celso@desa.ufmg.br).

## **INTRODUÇÃO**

O escopo deste trabalho consiste em descrever a dinâmica de fluxo, a condição do rebaixamento e as reservas renováveis das águas subterrâneas na Região Metropolitana de Fortaleza (**RMF**), em função das condições naturais do meio hidrogeológico e das condições de bombeamento expressas pela grande quantidade de poços existentes na região.

Para tanto, foi concebido um modelo hidrogeológico conceitual, o qual foi implementado numericamente no aplicativo computacional *Visual-MODFLOW* (Guiguer & Thomas, 1998). Este aplicativo permite simular o comportamento hidrodinâmico tridimensional dos aquíferos e, com isto, caracterizar a ocorrência e a distribuição do recurso hídrico subterrâneo, demonstrando o seu potencial estratégico como fonte para o atendimento das demandas de água para o abastecimento humano na **RMF**.

Por fim, considera-se pertinente ressaltar que este estudo refere-se à compilação de parte dos resultados apresentados na tese doutoramento do primeiro autor deste trabalho. Sendo assim, as análises discutidas aqui se encontram também embasadas nos dados gerados a partir desta referência (*i.e.* Fernandes, 2005).

## **OBJETIVOS**

Conforme o escopo acima, os objetivos deste trabalho consistem em apresentar os resultados do estudo hidrogeológico realizado. Tais objetivos estão voltados inicialmente para a concepção de um modelo hidrogeológico conceitual e, posteriormente, para a implementação de um modelo computacional, com a finalidade de caracterizar os aspectos relacionados à dinâmica do fluxo das águas subterrâneas, como também de analisar a condição do rebaixamento, em função dos poços de bombeamento cadastrados, e das reservas renováveis nos aquíferos reconhecidos na **RMF**.

## **METODOLOGIA**

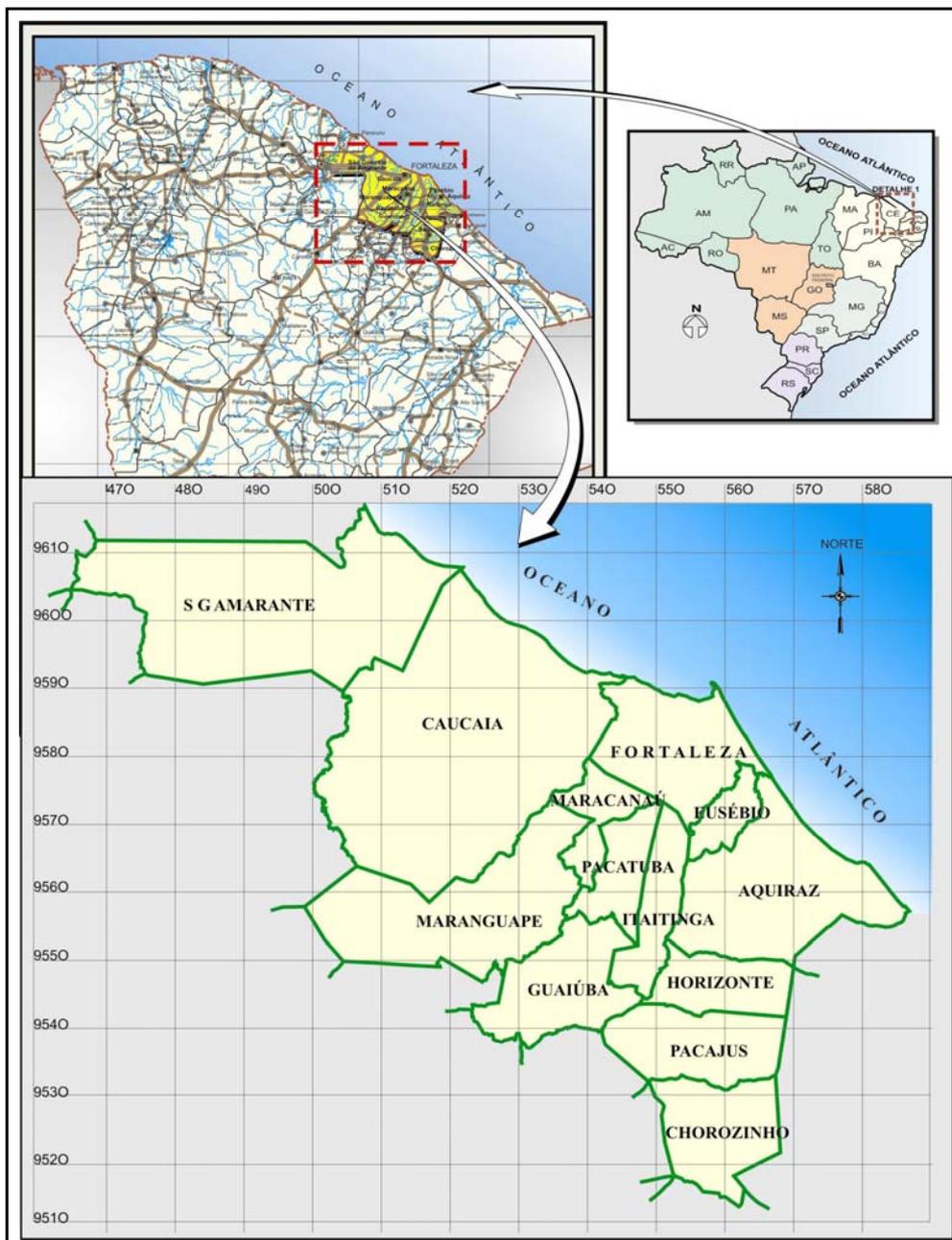
A metodologia empregada neste trabalho consistiu na execução das seguintes atividades:

- Compilação dos dados disponíveis;
- Caracterização geral da área investigada;
- Concepção do modelo hidrogeológico conceitual;
- Elaboração do modelo hidrogeológico computacional; e,
- Avaliação dos resultados e caracterização de aspectos hidrogeológicos pertinentes.

Conforme se verifica ao longo deste documento, estas atividades encontram-se organizadas de maneira hierárquica para propiciar o entendimento das informações necessárias para o estudo.

## **CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA INVESTIGADA**

Geograficamente, a Região Metropolitana de Fortaleza (**RMF**) situa-se entre os paralelos 465.000 e 586.000, de longitude leste, e os meridianos 9.510.000 e 9.615.000, de latitude norte, inserindo-se na porção norte do Estado do Ceará, Região Nordeste do Brasil (Figura 1).



**Figura 1** - Mapa esquemático de localização e distribuição dos municípios integrantes da **RMF**.  
(Fonte: modificado de Fernandes, 2005 – Base: Iplance, 1997).

Em termos de limites geopolíticos, a **RMF** abrange 13 municípios (Figura 1), quais sejam: Aquiraz, Caucaia, Chorozinho, Eusébio, Fortaleza, Guaiúba, Horizonte, Itaitinga, Maracanaú, Maranguape Pacajus, Pacatuba e São Gonçalo do Amarante. Os limites destes municípios se sobrepõem a uma superfície territorial da ordem de 4.976 km<sup>2</sup>. A população total residente é da ordem de 2.985.000 habitantes (96,5% em áreas urbanas), representando cerca de 40% da população total do estado do Ceará (IBGE, 2000).

Em termos geológicos, o território da **RMF** é composto por dois grandes domínios litológicos, quais sejam: o Embasamento Cristalino; e, as Coberturas Sedimentares. A distribuição dos litotipos que constituem estes domínios é apresentada na Figura 2. As principais características destas unidades estão descritas na TAB. 1 (Braga *et al.*, 1981; Brandão, 1995; Ribeiro *et al.*, 1997).

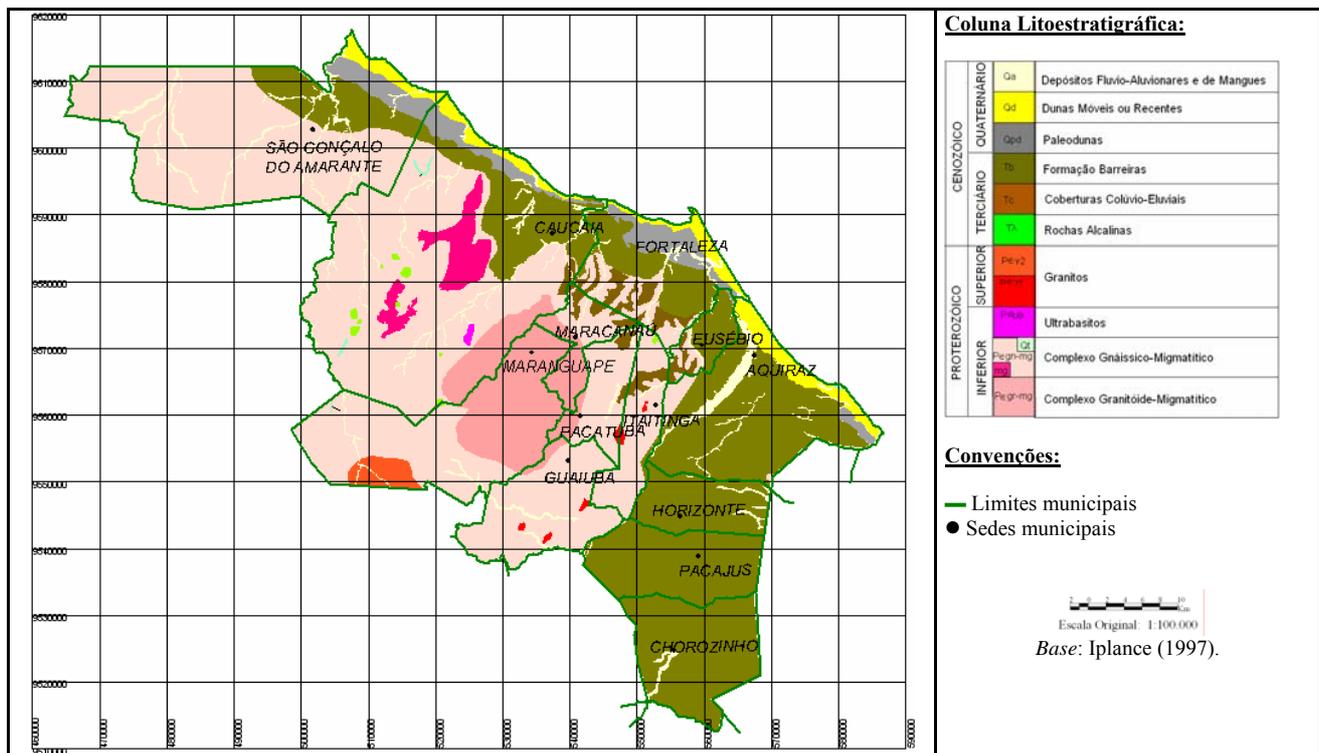


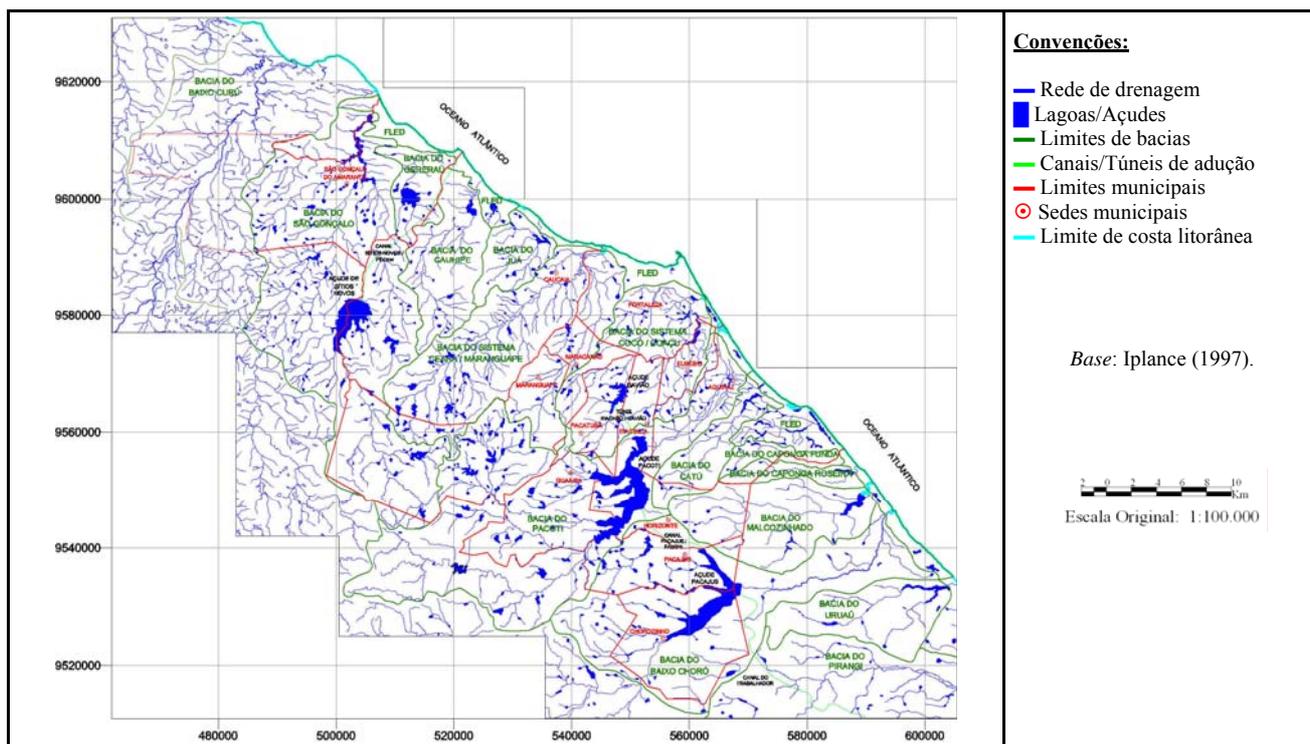
Figura 2 - Mapa geológico simplificado da RMF. (Fonte: compilado de Fernandes, 2005).

Tabela 1 - Unidades geológicas que compõem o cenário da RMF

Unidade Geológica	Descrição Geral
Depósito Flúvio-Aluvionar e de Mangues (Qa)	Compõe-se por areias, cascalhos, siltes e argilas, com ou sem matéria orgânica, compreendendo os sedimentos flúviais, lacustres ou estuarinos recentes. O contato de água doce com água salgada proporciona a floculação de argilas, resultando na deposição de material escuro e lamacento que forma o ambiente propício à instalação dos manguezais.
Dunas Recentes ou Móveis (Qd)	São constituídas por areias esbranquiçadas, bem selecionadas, de granulação fina a média, quartzosas, com grãos foscos e arredondados. Representa a acumulação de sedimentos removidos da face de praia pela deflação eólica e se distribui como um cordão contínuo, paralelo à linha de costa, possuindo uma largura de 2 a 3 km e espessuras de até 30 m.
Paleodunas (Qpd)	São constituídas de areias bem selecionadas, de granulação fina a média, de composição quartzosa inconsolidadas. Repousam discordantemente sobre os sedimentos da Formação Barreiras e são, em grande parte, cobertas pelas dunas móveis ou recentes. Ocorrem distribuídas de forma mais ou menos contínua ao longo da linha de costa, constituindo uma faixa de largura variável. As espessuras variam em torno de 15 m próximo à linha de costa. Para o interior mostram-se rebaixadas com progressiva redução da espessura e com as formas dissipadas em algumas áreas.
Coberturas Colúvio-Elúviais (Tc)	Constituem-se de material areno-argiloso, alaranjado e/ou avermelhado, de granulação fina a média, inconsolidado, com horizonte laterizado na base. A matriz é areno-argilosa caulinitica, com cimento argiloso/ferruginoso. Distribui-se de forma irregular como manchas ou "ilhas" que se assentam sobre os litotipos precambrianos, com espessuras reduzidas (< 3 m). São resultantes do intemperismo, <i>in situ</i> , ou com pequeno deslocamento gravitacional.
Formação Barreiras (Tb)	Constitui-se de sedimentos areno-argilosos, de granulação fina a média, mostrando horizontes conglomeráticos e níveis lateríticos, em geral, associados à percolação de água subterrânea. A matriz é argilosa caulinitica, com cimento argilo-ferruginoso e, às vezes, silicoso. Distribui-se como uma faixa de largura variável acompanhando a linha de costa, à retaguarda dos sedimentos eólicos antigos e atuais. Por vezes, ocorre muito próximo ao litoral chegando a aflorar na linha de praia. Na porção leste da área esses sedimentos penetram no interior até 30 km, constituindo o trecho mais largo da faixa. Sua espessura também é bastante variável em função do seu relacionamento com a superfície irregular do embasamento, sobre o qual repousa em discordância erosiva angular, aprofundando-se em direção à costa.
Vulcânicas Alcalinas (Tγ)	São individualizados sob a forma de <i>necks</i> ou <i>plugs</i> , os quais se sobressaem topograficamente como elevações circulares e elipsoidais. Neste contexto, foram identificadas quatro variedades petrográficas.
Granitos (Pεγ)	Granitos pré- a sin-tectônicos na forma de pequenos corpos dispostos segundo a foliação regional e com acentuada deformação. São de granulação média e de estrutura isotrópica, encerrando enclaves gnáissificados de natureza diorítica.
Ultrabásitos (Pεub)	Trata-se de um piroxenito maciço, de coloração preta-esverdeada e de granulação média. Ocorre na porção centro-oeste da área, com forma elipsoidal e alinhado segundo a direção NS. Está encaixado na seqüência gnáissica-migmatítica e os afloramentos ocorrem na forma de blocos soltos.
Complexo Gnáissico-Migmatítico (Pεgn-mg)	Constitui-se de gnáisses variados, além de migmatitos com estruturas diversas (mg). Suas exposições podem ser observadas na porção ocidental, onde ocorre uma seqüência paraderivada, constituída de gnáisses aluminosos, em parte migmatizados, intercalados por níveis quartzíticos (Unidade Qt). Os termos migmatíticos mais comuns são os de estrutura bandada/dobrada (Unidade mg).
Complexo Granitóide-Migmatítico (Pεgr-mg)	Constitui-se de granitóides, migmatitos e gnáisses migmatíticos, ocorrendo na porção ocidental da área. As melhores exposições situam-se nos setores morfologicamente mais elevados, as quais apresentam uma constituição predominantemente granitóide e podem ser entendidas como relevos residuais, formados a partir da erosão diferencial que rebaixou as áreas circundantes

Fonte: compilado de Braga et al. (1981); Brandão (1995); Ribeiro et al. (1997).

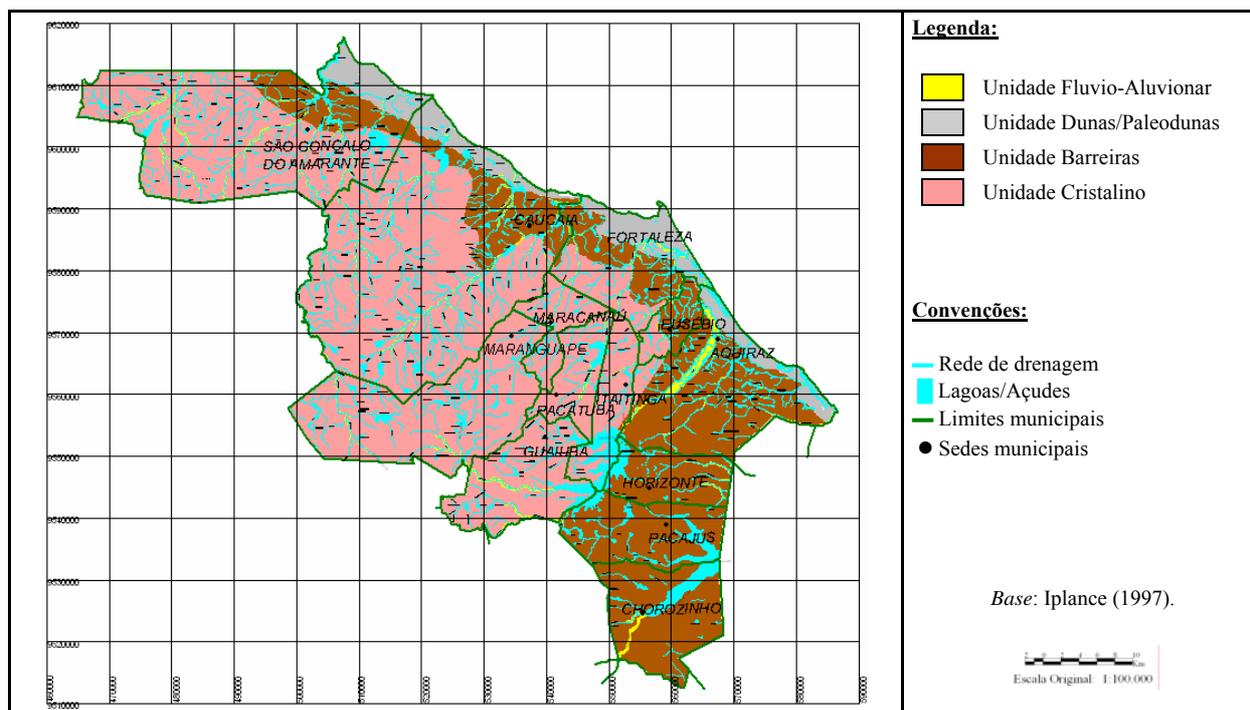
Em termos hidrográficos os municípios que compõem a **RMF** estão circunscritos pela Bacia do Curú e pelas Bacias Metropolitanas (Figura 3), sendo esta última composta por um conjunto de 14 bacias independentes, onde apenas as bacias do Pirangi, Choró, Pacoti, São Gonçalo e os sistemas Ceará/Maranguape e Cocó/Coaçu são mais representativas (Ceará, 1992). A partir da área de abrangência destas bacias, a área de influência hidrográfica para a **RMF** foi definida, compreendendo parte da Bacia do rio Curú (Região do Baixo Curú), que circunscribe o município de São Gonçalo do Amarante, e a maioria das Bacias Metropolitanas, excetuando-se apenas as bacias dos rios Pirangi e Uruaú, as quais não recobrem o território da **RMF** (Figura 3).



**Figura 3** - Distribuição da rede de drenagem e das principais bacias hidrográficas da **RMF**.  
(Fonte: compilado de Fernandes, 2005).

Em termos climatológicos, constata-se que na **RMF** as chuvas se concentram no primeiro semestre (cerca de 90% do total anual), sendo o trimestre fevereiro/abril ou março/maio responsável por cerca de 65% a 70% do total anual. Somente o mês de pico (março ou abril) concentra, em média, mais de 25% da pluviometria anual; este período de chuvas é denominado de “inverno”. No conjunto, as condições climáticas favorecem o fenômeno da evaporação, provocando perdas hídricas consideráveis nos volumes acumulados em superfícies livres de água (açudes). Já a evapotranspiração potencial ocorre com índices médios anuais sempre superiores a 1.500 mm. Por sua vez, a evapotranspiração real acontece com valores médios anuais inferiores a 1.000 mm.

Em termos hidrogeológicos, constata-se que os principais sistemas da **RMF** relacionam-se à distribuição das regiões cristalinas e sedimentares (Campos & Menezes, 1982; Bianchi *et al.*, 1984; Cavalcante, 1998; Cavalcante *et al.*, 2000; CPRM, 2000). A distribuição destas unidades pode ser visualizada na Figura 4. Já as suas principais características são descritas na TAB. 2.



**Figura 4 -** Distribuição das unidades hidrogeológicas reconhecidas na RMF. (Fonte: Fernandes, 2005).

**Tabela 2 -** Descrição geral das unidades hidrogeológicas reconhecidas na RMF

Unidade Hidrogeológica	Descrição Geral
Fluvio-Aluvionar	Representa cerca de 4% da área da RMF. Nas aluviões, as altas permeabilidades das frações arenosas compensam as pequenas espessuras saturadas, de modo que é possível a obtenção de vazões expressivas através de captações rasas e de baixo custo. Dentro das áreas urbanas dos municípios da RMF, as águas subterrâneas desta unidade estão comprometidas pela poluição derivada de esgotos domésticos e industriais. Constituem aquíferos livres, com espessuras de até 5 m e nível estático sub-aflorante. A recarga provém da precipitação pluviométrica, dos rios influentes e das águas subterrâneas das unidades Dunas/Paleodunas e Barreiras. Como exutórios tem-se a evapotranspiração e a própria drenagem. Somente a montante da equipotencial de 5 m é possível captar água subterrânea sem a presença de níveis elevados de cloretos.
Dunas/Paleodunas	Ocupa cerca de 6% da área da RMF. Este sistema representa o principal aquífero da região, pois nele são armazenados os maiores volumes de água subterrânea do semi-árido brasileiro. Representa um aquífero livre, com espessuras saturadas oscilando de poucos metros a até 10 m, nível estático normalmente sub-aflorante nas áreas de descarga, atingindo, em média, 6 m. Suas águas são captadas por poços tubulares rasos, com profundidades inferiores a 20 m, perfurados normalmente em 10" e revestidos em 6" ou 4", que produzem vazão média de 6 m³/h podendo alcançar, localmente, até 13 m³/h, refletindo capacidades específicas que oscilam de 0,02 a 23 m³/h/m. Possui como característica básica uma dupla função hidrogeológica, refletida no funcionamento do sistema como aquífero principal e aquífero de transferência do potencial hídrico para unidades sotopostas, a exemplo do Barreiras. Observa-se que os valores médios de condutividade hidráulica e transmissividade oscilam de $0,73 \times 10^{-4}$ m/s a $2,50 \times 10^{-4}$ m/s e de 2,37 m²/h a 6,98 m²/h, respectivamente. No geral, o fluxo das águas subterrâneas se processa para o mar. As maiores perdas d'água do aquífero são por consequência da intensa evapotranspiração, associada a um nível estático sub-aflorante. A recarga é pluviométrica, salvo exceções causadas por drenagens influentes. Dados os elevados valores de condutividade hidráulica, transmissividade e porosidade efetiva, esta unidade é altamente susceptível a poluição.
Barreiras	Ocupa cerca de 30% da área da RMF. Esta unidade corresponde aos sedimentos Terciários do Grupo Barreiras. Localmente, constitui um aquífero livre, com características regionais de semi-confinamento em função dos níveis silto-argilosos, tendo como fatores de recarga a precipitação pluviométrica, as drenagens influentes que percolam o contexto, as lagoas interdundares e o sistema dunas/paleodunas que funciona com dupla função (i.e. aquífero e unidade de transferência de água). Como exutório tem-se a rede de drenagem efluente, lagoas, evapotranspiração e o meio cristalino sotoposto.
Cristalino	Ocupa cerca de 60% da área da RMF, onde a água subterrânea ocorre em sistemas de fendas e fraturas interconectadas, descontínuas e com extensão limitada. As reservas são alimentadas pela infiltração no solo de águas de precipitação, de águas superficiais dos cursos naturais, ou ainda de lagos. Os poços têm profundidade média de 50 a 60 m, nível estático oscilando entre 10 e 20 m, vazão média de 2 e 3 m³/h e capacidade específica inferior a 1 m³/h/m. Os exutórios são representados por drenagens efluente e pela evapotranspiração. Além disso, são imensas as dificuldades e restrições associadas às reservas subterrâneas (e.g. recursos aleatórios, escassos, de má qualidade e de pouco conhecimento). Nos domínios desta unidade, a pouca cobertura vegetal e a pequena espessura do solo constituem um ecossistema frágil cujas características físico-ambientais reduzem o potencial produtivo dos aquíferos

Fonte: compilação de informações de Campos & Menezes (1982); Bianchi et al. (1984); Iplance (1997); Cavalcante, 1998; Cavalcante et al. (2000); CPRM (2000).

Ademais, cabe relatar que na RMF a caracterização das fontes de abastecimento por águas subterrâneas revelou a ocorrência de 12.710 pontos de exploração de águas subterrâneas (TAB. 3), sendo 2.052 pontos (16,1%) relacionados ao sistema de abastecimento público, e 10.658 pontos

(83,9%) relacionados ao sistema privado (e.g. Golder/Pivot, 2005; Fernandes, 2005). Desse total de pontos, constatou-se que 8.888 poços encontram-se atualmente em uso, sendo 12,4% relativos ao sistema público (1.099 poços) e 87,6% relativos ao sistema privado (7.789 poços). As vazões médias produzidas por poço foram estimadas em 2,8 m<sup>3</sup>/h, 3,5 m<sup>3</sup>/h, 4,5 m<sup>3</sup>/h e 5,5 m<sup>3</sup>/h para as unidades Cristalino, Barreiras, Paleodunas e Dunas, respectivamente.

**Tabela 3** - Poços cadastrados na **RMF**, por município, unidade aquífera, categoria (público ou privado) e situação de uso

Municípios	Unidade Aquífera	Número de Poços Cadastrados			Número de Poços em Uso		
		Público	Privado	Total	Público	Privado	Total
Aquiraz	Dunas	32	285	317	25	263	288
	Paleodunas	7	10	17	7	7	14
	Barreiras	161	373	534	138	299	437
	Cristalino	14	24	38	11	19	30
	<b>Sub-Total</b>	<b>214</b>	<b>692</b>	<b>906</b>	<b>181</b>	<b>588</b>	<b>769</b>
Caucaia	Dunas	9	227	236	5	206	211
	Paleodunas	10	124	134	6	115	121
	Barreiras	174	819	993	124	674	798
	Cristalino	98	272	370	51	171	222
	<b>Sub-Total</b>	<b>291</b>	<b>1.442</b>	<b>1.733</b>	<b>186</b>	<b>1.166</b>	<b>1.352</b>
Chorozinho	Barreiras	48	35	83	36	26	62
	Cristalino	0	1	1	0	1	1
	<b>Sub-Total</b>	<b>48</b>	<b>36</b>	<b>84</b>	<b>36</b>	<b>27</b>	<b>63</b>
Eusébio	Dunas	5	36	41	4	31	35
	Paleodunas	8	26	34	7	22	29
	Barreiras	60	231	291	52	189	241
	Cristalino	19	61	80	15	49	64
	<b>Sub-Total</b>	<b>92</b>	<b>354</b>	<b>446</b>	<b>78</b>	<b>291</b>	<b>369</b>
Fortaleza	Dunas	178	1.728	1.906	34	1.286	1.320
	Paleodunas	187	2.554	2.741	58	1.824	1.882
	Barreiras	244	2.020	2.264	122	1.363	1.485
	Cristalino	119	253	372	35	187	222
	<b>Sub-Total</b>	<b>728</b>	<b>6.555</b>	<b>7.283</b>	<b>249</b>	<b>4.660</b>	<b>4.909</b>
Guaiúba	Cristalino	28	61	89	8	39	47
	<b>Sub-Total</b>	<b>28</b>	<b>61</b>	<b>89</b>	<b>8</b>	<b>39</b>	<b>47</b>
Horizonte	Barreiras	86	261	347	64	201	265
	Cristalino	1	1	2	1	1	2
	<b>Sub-Total</b>	<b>87</b>	<b>262</b>	<b>349</b>	<b>65</b>	<b>202</b>	<b>267</b>
Itaitinga	Barreiras	8	10	18	7	6	13
	Cristalino	71	83	154	41	69	110
	<b>Sub-Total</b>	<b>79</b>	<b>93</b>	<b>172</b>	<b>48</b>	<b>75</b>	<b>123</b>
Maracanaú	Barreiras	0	20	20	0	13	13
	Cristalino	63	255	318	15	124	139
	<b>Sub-Total</b>	<b>63</b>	<b>275</b>	<b>338</b>	<b>15</b>	<b>137</b>	<b>152</b>
Maranguape	Cristalino	104	226	330	35	102	137
	<b>Sub-Total</b>	<b>104</b>	<b>226</b>	<b>330</b>	<b>35</b>	<b>102</b>	<b>137</b>
Pacajus	Barreiras	185	170	355	141	129	270
	Cristalino	1	0	1	1	0	1
	<b>Sub-Total</b>	<b>186</b>	<b>170</b>	<b>356</b>	<b>142</b>	<b>129</b>	<b>271</b>
Pacatuba	Barreiras	0	15	15	0	11	11
	Cristalino	38	150	188	11	117	128
	<b>Sub-Total</b>	<b>38</b>	<b>165</b>	<b>203</b>	<b>11</b>	<b>128</b>	<b>139</b>
S. G. Amarante	Dunas	2	36	38	2	35	37
	Paleodunas	15	30	45	6	27	33
	Barreiras	9	33	42	5	30	35
	Cristalino	68	228	296	32	153	185
	<b>Sub-Total</b>	<b>94</b>	<b>327</b>	<b>421</b>	<b>45</b>	<b>245</b>	<b>290</b>
<b>TOTAL</b>		<b>2.052</b>	<b>10.658</b>	<b>12.710</b>	<b>1.099</b>	<b>7.789</b>	<b>8.888</b>
<b>PERCENTUAL</b>		<b>16,1%</b>	<b>83,9%</b>	<b>100,0%</b>	<b>12,4%</b>	<b>87,6%</b>	<b>100,0%</b>

Fonte: compilado de Golder/Pivot (2005) e Fernandes (2005).

Apesar do grande número de poços existentes na **RMF** (TAB. 3), no contexto geral, constata-se que o principal sistema responsável pelo abastecimento público de água constitui-se de um conjunto de reservatórios superficiais (açudes), conectados por obras de canais e túneis, formando

uma rede integrada de distribuição. Em 2000, este sistema de distribuição era responsável pelo atendimento de cerca de 72% das demandas totais existentes (o equivalente a 243,2 milhões de m<sup>3</sup>/ano), consolidadas pelo consumo doméstico, industrial e dessedentação de animais. Assim, no referido ano, cerca de 28% das demandas (o equivalente a 93,0 milhões de m<sup>3</sup>/ano) eram atendidas por águas subterrâneas, principalmente aquelas relacionadas ao consumo doméstico e industrial (COGERH, 2001; Golder/Pivot, 2005). Desse percentual de água subterrânea, 6,5% eram ofertadas pelo sistema público, enquanto o sistema privado garantia 21,5% da oferta.

Por fim, cabe ressaltar que na **RMF**, em função de suas características geológicas e climatológicas, a escassez dos recursos hídricos tem sido pauta de constantes estudos, discussões e conflitos. Neste cenário, as águas subterrâneas sempre assumiram um papel de importância estratégica, mesmo diante de condições de distribuição e ocorrência desfavoráveis e de desconhecimento de seu potencial integrado. Apesar de existirem diversos estudos que tratam especificamente sobre a questão das águas subterrâneas nesta região (e.g. Campos & Menezes, 1982; Bianchi *et al.*, 1984; Iplance, 1997; Cavalcante, 1998; Cavalcante *et al.*, 2000; CPRM, 1998, 1999, 2000), reconhece-se a falta de estudos integrados sobre as suas disponibilidades, que agreguem conhecimento para o desenvolvimento de estruturas de gerenciamento voltadas para o planejamento de sua utilização e a proteção dos sistemas aquíferos explorados.

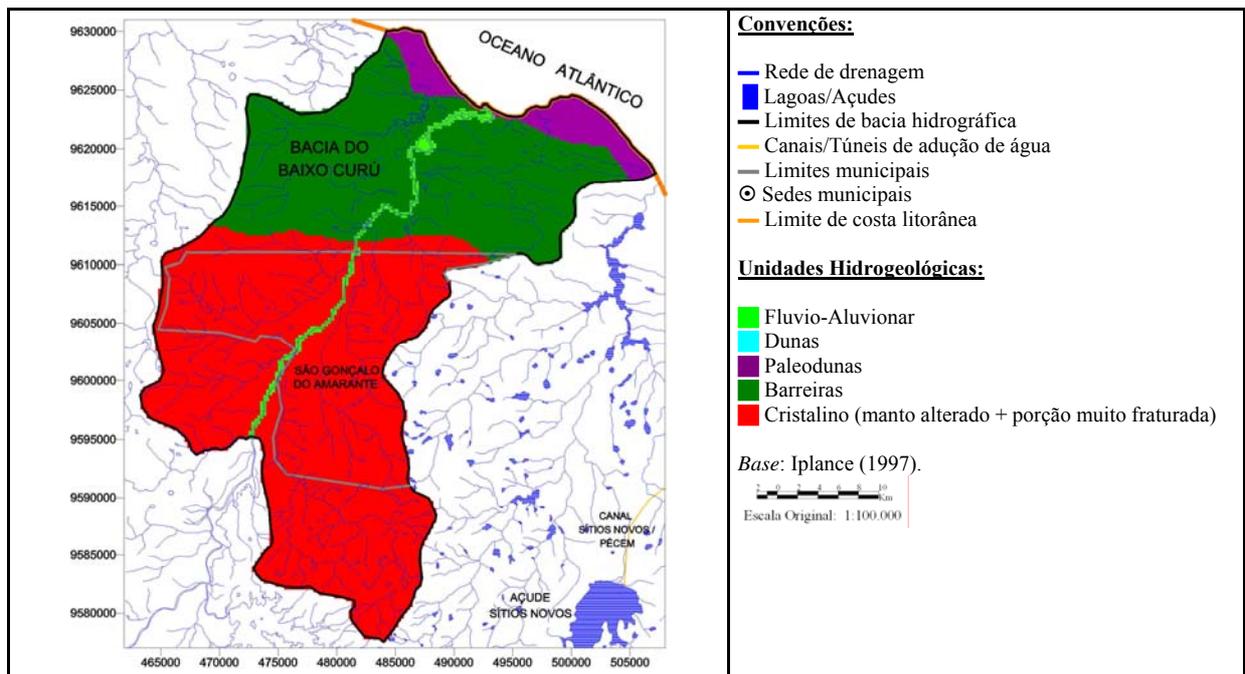
## **CONCEPÇÃO DO MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL**

O modelo hidrogeológico conceitual consiste no resgate de informações diversas, com a finalidade de definir o domínio de interesse para o modelamento computacional e apresentar os elementos condicionantes para a implementação deste modelo (tais como: unidades hidrogeológicas e parâmetros hidráulicos).

### **Domínio de Interesse**

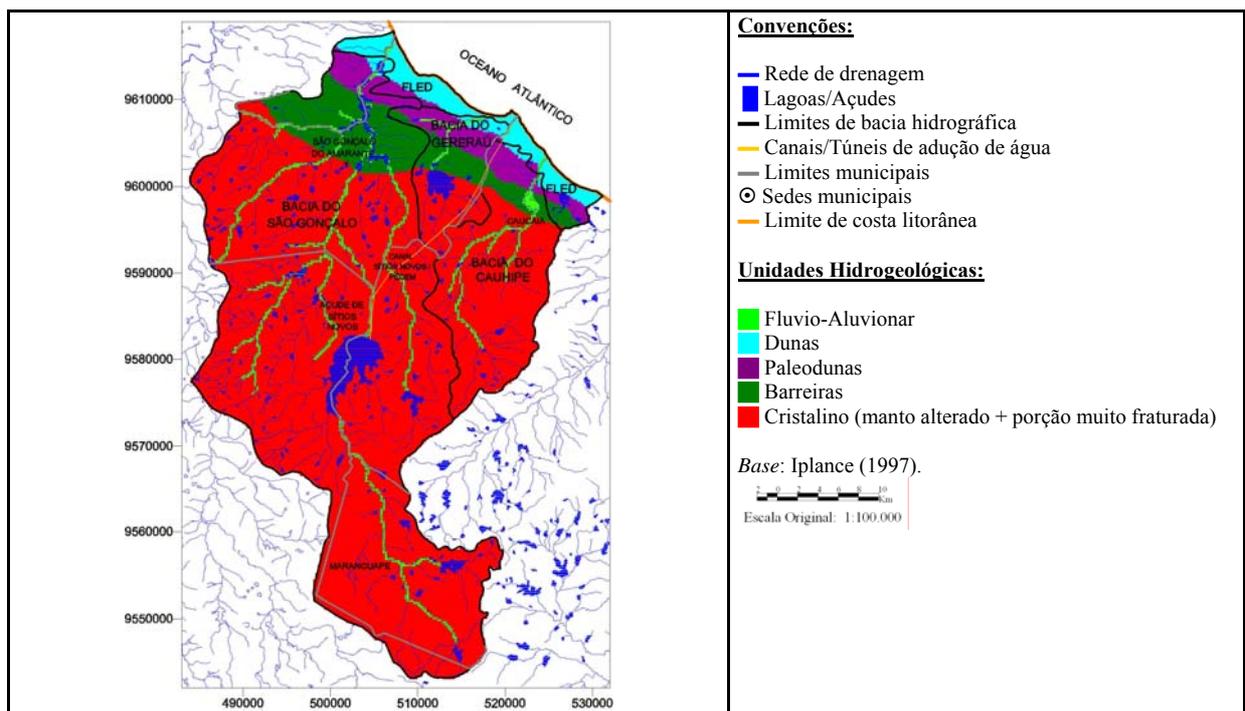
Conforme descrito anteriormente, a **RMF** engloba as fronteiras geopolíticas de 13 municípios. Entretanto, para uma avaliação hidrogeológica é preciso definir fronteiras embasadas nos contornos hidrográficos da região. Neste sentido, constata-se que o contorno da **RMF** está circunscrito pela Bacia do Curú e pelas Bacias Metropolitanas (ver Figura 3).

Contudo, em função da vasta área da **RMF**, a análise do comportamento hidrogeológico desta região será executada considerando 4 domínios de modelamento distintos, definidos em função dos limites das bacias hidrográficas principais. O primeiro domínio (Figura 5) corresponde a uma porção da Bacia do Curú, denominada de Bacia do Baixo Curú, a qual é drenada pelo rio homônimo. Esta bacia se sobrepõe à porção oeste do município de São Gonçalo do Amarante. A apresenta um relevo moderado, com grande parcela de seus divisores de água formada por zonas montanhosas. A configuração espacial não favorece a formação de cheias e a rede hidrográfica apresenta padrões subparalelos e angulares.



**Figura 5** - Primeiro domínio de modelamento hidrogeológico da **RMF** (bacia do Baixo Curú).  
(Fonte: compilado de Fernandes, 2005).

O segundo domínio de modelamento (Figura 6) compreende as bacias de São Gonçalo, do Cauhipe e do Gereraú, bem como a Faixa Litorânea de Escoamento Difuso – **FLED**. Cabe ressaltar que, neste domínio, a Bacia do São Gonçalo é a mais representativa, apresentando um arranjo espacial dendrítico, desenvolvido em rochas de diferentes resistências. Já as bacias do Cauhipe e do Gereraú apresentam um padrão de drenagem dendrítico e têm importância secundária em relação à Bacia do São Gonçalo. Por sua vez, na **FLED** a drenagem é pouco desenvolvida, sendo mais comum à presença de pequenas lagoas perenes e intermitentes.



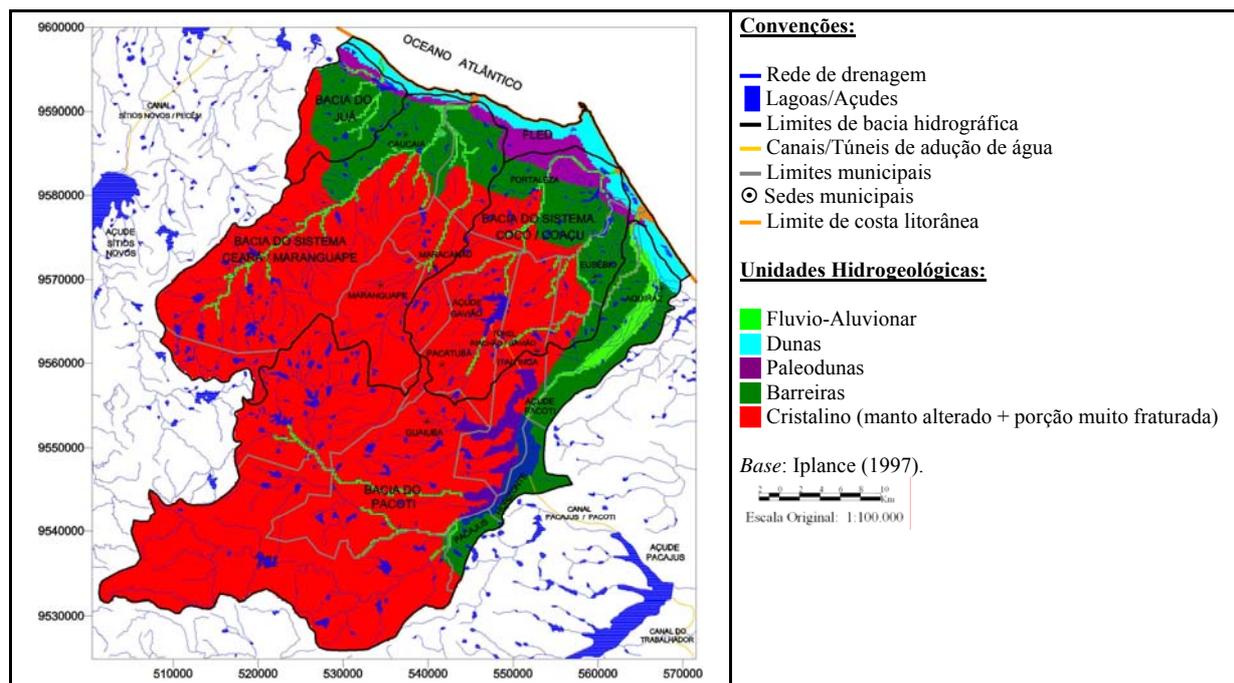
**Figura 6** - Segundo domínio de modelamento hidrogeológico da **RMF** (bacias de São Gonçalo, Gereraú, Cauhipe e **FLED**). (Fonte: compilado de Fernandes, 2005).

O terceiro domínio de modelamento (Figura 7) compreende as bacias do Juá, do Sistema Ceará/Maranguape, do Sistema Cocó/Coaçu, do Pacoti e **FLED**. Estas bacias recobrem, parcialmente, os territórios de Caucaia, Maranguape e Aquiraz, e, integralmente, os territórios de Fortaleza, Maracanaú, Pacatuba, Eusébio, Itaitinga e Guaiúba. A bacia do Juá é a de menor representatividade.

Considerando o Sistema Ceará/Maranguape, observa-se que a bacia do rio Ceará apresenta uma configuração espacial retangular e se desenvolve no sentido sudoeste-norte. Já a bacia do rio Maranguape não exerce muita influência na fluviometria, comportando-se quase como uma bacia independente e unindo-se ao rio Ceará apenas próximo à sua foz.

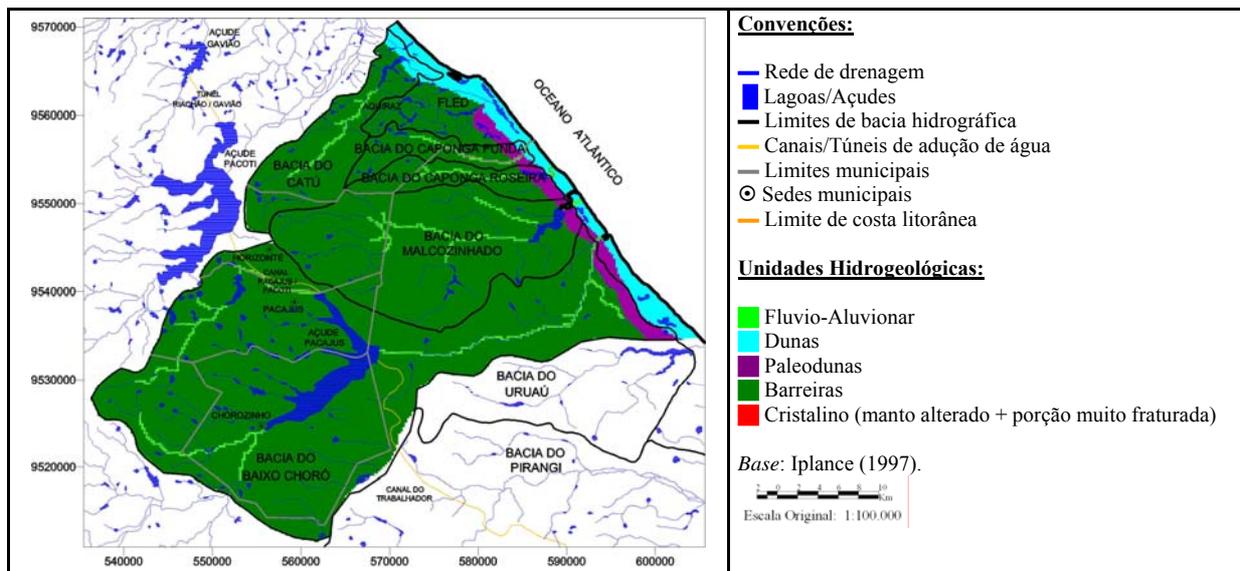
No Sistema Cocó/Coaçu, o rio Cocó, que se desenvolve no sentido sul/norte, forma em direção a foz uma acentuada curva de sudoeste para leste. Já a bacia do Pacoti apresenta uma rede de drenagem predominantemente dendrítica.

Cabe ressaltar ainda que, neste domínio, insere-se o principal sistema público de abastecimento de água da **RMF**, composto por um conjunto de açudes (Pacajus, Pacoti e Gavião) interligados por canais e túneis de adução.



**Figura 7** - Terceiro domínio de modelamento hidrogeológico da **RMF** (bacias do Juá, Pacoti, e os sistemas Ceará/Maranguape e Cocó/Coaçu, e **FLED**). (Fonte: compilado de Fernandes, 2005).

Por fim, o quarto domínio de modelamento (Figura 8) é definido pelas bacias do Baixo Choró, Catú, Malcozinhado, Caponga Funda, Caponga Roseira e **FLED**. Estas bacias ora apresentam um padrão de drenagem dendrítico, ora apresentam formas retangulares. Em conjunto, estas bacias recobrem parcialmente os municípios de Aquiraz, Horizonte e Pacajus, e, integralmente, o município de Chorozinho. Cabe ressaltar ainda que as bacias do Pirangi e Uruaú encontram-se fora dos limites propostos para o modelamento.



**Figura 8** - Quarto domínio de modelamento hidrogeológico da **RMF**(bacias Baixo Choró, Catú, Caponga Funda, Caponga Roseira, Malcozinhado e **FLED**). (Fonte: Fernandes, 2005).

### Unidades Hidrogeológicas e Condutividades Hidráulicas

O Sistema Cristalino, apesar dos vários litotipos representantes, considera-se apenas uma unidade hidrogeológica indiferenciada, denominada de Unidade Cristalino, no entanto, com variações no seu grau de fraturamento. Neste sentido, pode-se reconhecer, nos primeiros 50 m de profundidade, uma camada altamente fratura e com material do manto de alteração. Já nos próximos 50 m foi considerada uma rocha sã pouco fraturada e, a partir dos 100 m de profundidade, o embasamento cristalino sem fraturamento expressivo. Já o Sistema Hidrogeológico Sedimentar engloba quatro unidades, quais sejam: Barreiras; Paleodunas; Dunas; e, Fluvio-Aluvionar.

Com o intuito de avaliar os valores de condutividade hidráulica destas unidades, foram realizados 100 testes de bombeamento em poços criteriosamente selecionados e distribuídos pela **RMF** (Golder/Pivot, 2005; Fernandes, 2005). Os resultados destes testes revelaram uma variação de valores de condutividade para as principais unidades hidrogeológicas, como mostrado a TAB. 4.

**Tabela 4** - Variação dos valores de condutividade hidráulica, obtidos com os testes de bombeamento

Unidade Aquífera	Nº de pontos ensaiados	Variação dos valores de condutividade hidráulica, K (cm/s)		
		Min.	Máx.	Média
Dunas	11	$1,12 \times 10^{-04}$	$5,29 \times 10^{-02}$	$1,34 \times 10^{-02}$
Paleodunas	9	$2,10 \times 10^{-04}$	$2,85 \times 10^{-02}$	$9,69 \times 10^{-03}$
Barreiras	68	$1,23 \times 10^{-05}$	$1,20 \times 10^{-02}$	$6,79 \times 10^{-04}$
Cristalino	12	$1,27 \times 10^{-05}$	$1,46 \times 10^{-03}$	$2,82 \times 10^{-04}$

Fonte: compilado de Fernandes (2005).

Cabe ressaltar ainda que para o Sistema Cristalino, em função da variação vertical do grau de fraturamento e da espessura do manto de alteração, foram consideradas variações nos valores de condutividade hidráulica. Para os níveis mais profundos e intermediários foram adotados valores, baseados na literatura (e.g. Frezee & Cherry, 1979), de  $5,0 \times 10^{-06}$  e  $5,0 \times 10^{-05}$  cm/s, respectivamente. Da mesma maneira, para a Unidade Fluvio-Aluvionar foi adotado um valor de  $8,0 \times 10^{-02}$  cm/s.

Assim, com base na variação dos valores dos testes de bombeamento e nos valores de literatura, foram indicados valores específicos de condutividade hidráulica para todas as unidades hidrogeológicas consideradas nos 4 domínios de modelamento propostos para a **RMF** (TAB. 5).

**Tabela 5** - Valores de condutividade hidráulica horizontal e vertical,  $K_H$  e  $K_V$ , adotados no modelamento hidrogeológico e espessura média das Unidades Hidroestratigráficas

Unidade Aquífera	Espessura Média (m)	Valores de K adotados no modelamento	
		$K_H$ (cm/s)	$K_V$ (cm/s)
 Fluvio-Aluvionar	< 10	$8,0 \times 10^{-02}$ (b)	$8,0 \times 10^{-02}$ (b)
 Dunas	< 20	$3,0 \times 10^{-02}$ (a)	$3,0 \times 10^{-03}$ (a)
 Paleodunas	20 - 30	$1,0 \times 10^{-02}$ (a)	$1,0 \times 10^{-03}$ (a)
 Barreiras	~ 40	$4,0 \times 10^{-03}$ (a)	$4,0 \times 10^{-04}$ (a)
 Cristalino (manto de alteração + porção altamente fraturada)	~ 50	$9,0 \times 10^{-04}$ (a)	$9,0 \times 10^{-05}$ (a)
 Cristalino (porção com grau de fraturamento moderado)	~ 50	$5,0 \times 10^{-05}$ (b)	$5,0 \times 10^{-06}$ (b)
 Cristalino (rocha sã, sem fraturamento significativo)	-	$5,0 \times 10^{-06}$ (b)	$5,0 \times 10^{-07}$ (b)

Fonte: <sup>(a)</sup> Golder/Pivot (2005) e Fernandes (2005); <sup>(b)</sup> Frezee & Cherry (1979).

## RESULTADOS DO MODELO HIDROGEOLÓGICO COMPUTACIONAL

O modelo hidrogeológico computacional reflete uma representação das condições reais caracterizadas no modelo conceitual. Para a validação deste modelo faz-se necessária uma etapa de calibração, a qual se constitui num reflexo dos resultados alcançados no processo de modelagem computacional. Tais resultados serão apresentados para os quatro domínios previamente definidos.

Posteriormente, os resultados gerados pelos modelos individuais serão integrados para comporem um contexto hidrogeológico unificado, e também para condensar a apresentação dos temas pertinentes à caracterização do fluxo hidrodinâmico e dos rebaixamentos existentes na **RMF**.

Considerando que tais modelos foram desenvolvidos considerando um regime de fluxo permanente, ou estado estacionário, os parâmetros que afetam a distribuição espacial das cargas hidráulicas são os valores de condutividade hidráulica e de recarga. Os valores da condutividade hidráulica foram fixados em função dos testes de bombeamento realizados na **RMF**, como também de dados da literatura (*e.g.* Frezee & Cherry, 1979). Por outro lado, os valores de recarga serviram como parâmetros de ajuste para a calibração dos modelos desenvolvidos e os seus valores característicos serão apresentados quando da descrição dos resultados obtidos.

Para representar a condição atual de utilização dos sistemas aquíferos em questão, serão considerados, dentro do universo total de 12.710 poços cadastrados, apenas aqueles poços em operação (8.888 poços). Neste caso, os poços públicos correspondem a 1.099 pontos, onde o regime de operação considerado é de 20 horas diárias. Já os poços privados correspondem a 7.789 pontos, onde o regime de operação considerado é de 8 horas diárias, dadas as elevadas demandas humanas e industriais, bem como a insuficiente capacidade instalada do sistema de abastecimento principal. As vazões alocadas para estes poços correspondem àquelas apresentadas no cadastro. Para os poços sem esta informação adotou-se um valor médio, conforme a unidade produtora ( $2,8 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $3,5 \text{ m}^3/\text{h}$ ,

4,5 m<sup>3</sup>/h e 5,5 m<sup>3</sup>/h para as unidades Cristalino, Barreiras, Paleodunas e Dunas, respectivamente). A contabilização destes poços é apresentada na TAB. 6.

**Tabela 6 - Poços cadastrados na RMF, por unidade produtora, categoria, uso e domínios de modelamento**

Domínio de Modelamento	Unidade Produtora	Distribuição Total de Poços		Distribuição dos Poços em Uso	
		Público	Privado	Público	Privado
Primeiro	Cristalino	11	40	4	29
	Parcial	5	46	4	29
	<b>Total Parcial</b>	<b>51</b>	<b>33</b>		
Segundo	Cristalino	120	303	58	188
	Barreiras	39	156	23	138
	Paleodunas	29	54	6	60
	Dunas	18	45	2	55
	Parcial	206	558	89	441
<b>Total Parcial</b>	<b>764</b>	<b>530</b>			
Terceiro	Cristalino	396	1.359	191	809
	Barreiras	539	3.205	362	2.302
	Paleodunas	270	2.607	73	1.930
	Dunas	240	2.063	57	1.621
	Parcial	1.445	9.234	683	6.662
<b>Total Parcial</b>	<b>10.679</b>	<b>7.345</b>			
Quarto	Barreiras	299	709	296	497
	Paleodunas	13	14	13	9
	Dunas	84	97	14	151
	Parcial	396	820	323	657
	<b>Total Parcial</b>	<b>1.216</b>	<b>980</b>		
<b>Geral</b>	<b>2.052</b>	<b>10.658</b>	<b>1.098</b>	<b>7.789</b>	
<b>Total Geral</b>	<b>12.710</b>	<b>8.888</b>			

Fonte: compilado de Golder/Pivot (2005) e Fernandes (2005).

Ademais, considerando a necessidade de se definir pontos de observação dos níveis de água subterrânea nos aquíferos, foram adotadas duas fontes distintas para a calibração dos modelos desenvolvidos. A primeira refere-se às cotas de intercessão dos cursos d'água com a topografia do terreno. Neste caso, os valores obtidos representam as cotas dos níveis d'água no sistema. A segunda refere-se às cotas do nível d'água nos poços cadastrados. Neste caso, foram escolhidos pontos situados entre os cursos d'água, os quais tiveram os valores de cota do nível d'água identificados a partir de uma superfície média de rebaixamento.

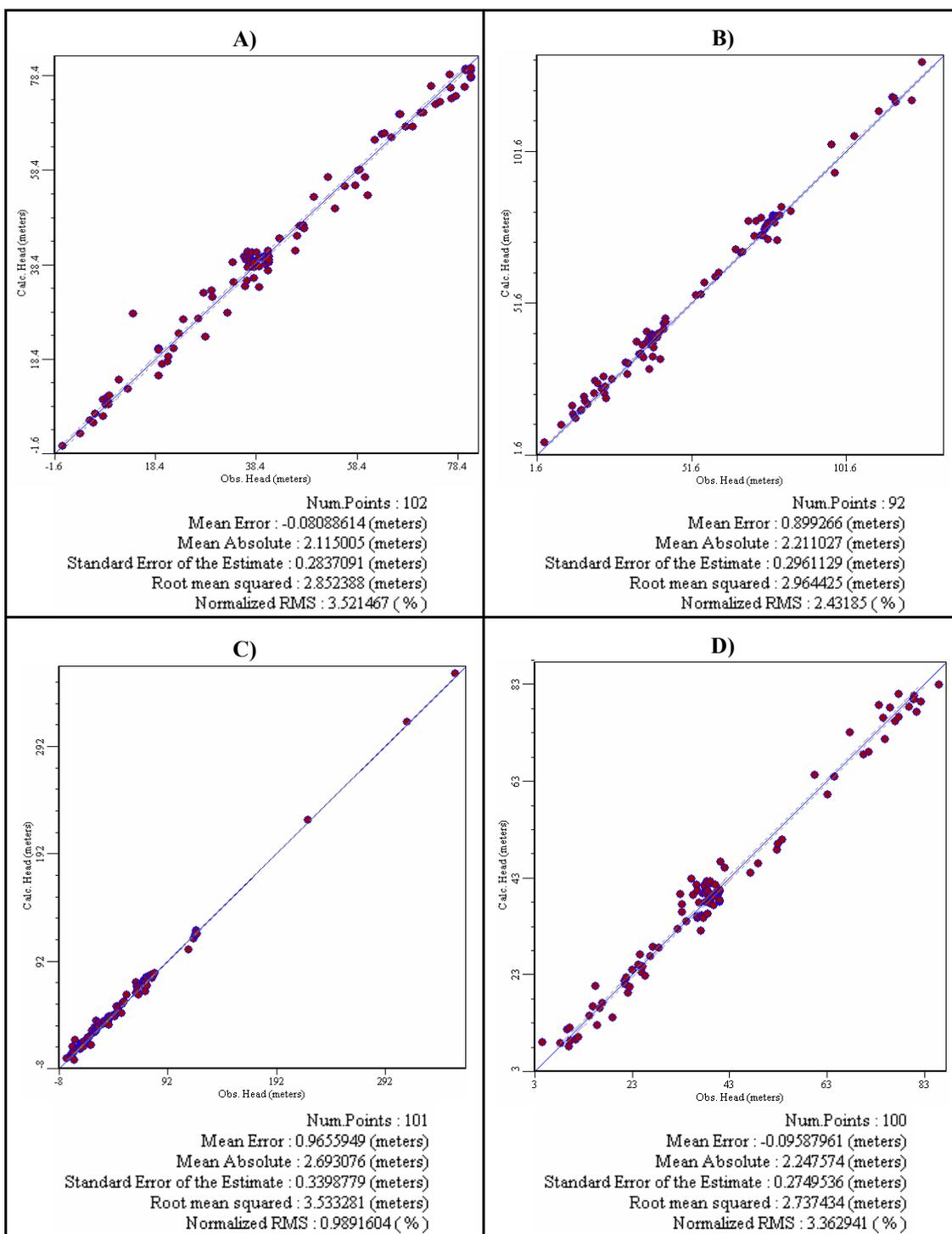
Sendo assim, o processo de calibração consistiu em ajustar os valores de recarga, de modo a minimizar a diferença entre os valores de carga hidráulica calculados pelo modelo e aqueles dos pontos de observação. Os resultados alcançados neste processo de ajuste dos valores de recarga são apresentados a seguir, na TAB. 7, para os quatro domínios de modelamento propostos para a RMF.

**Tabela 7 - Valores de recarga usados na calibração do primeiro domínio**

Domínio de Modelamento	Unidade Hidrogeológica	Recarga (mm/ano)
Primeiro	Paleodunas	185,0
	Barreiras	105,0
	Cristalino (manto de alteração + porção altamente fraturada)	30,0
Segundo	Dunas	215,0
	Paleodunas	170,0
	Barreiras	95,0
Terceiro	Cristalino (manto de alteração + porção altamente fraturada)	30,0
	Dunas	200,0
	Paleodunas	170,0
	Barreiras	90,0
Quarto	Cristalino (manto de alteração + porção altamente fraturada)	25,0
	Dunas	220,0
	Paleodunas	190,0
	Barreiras	115,0

Nota: dados de calibração do modelo computacional.

Considerando estes valores de recarga da TAB. 7 e os valores de condutividade hidráulica (TAB. 5), bem como os poços de bombeamento presentes nestes domínios (TAB. 6), pôde-se proceder ao processo de calibração dos modelos a partir dos dois conjuntos de pontos de observação das cotas do nível d'água. Os resultados das calibrações foram consideradas satisfatórias para todos os domínios de modelamento propostos, com erros médios situados entre -0,08 e +0,96 m, como mostrado na Figura 9 A, B, C e D, representativas do primeiro, segundo, terceiro e quarto domínio de modelamento, respectivamente.



**Figura 9** - Resultado de calibração nos domínios de modelamento propostos para a **RMF**. A) Primeiro Domínio; B) Segundo Domínio, C) Terceiro Domínio; e, D) Quarto Domínio. (Fonte: Fernandes, 2005).

## DISCUSSÕES

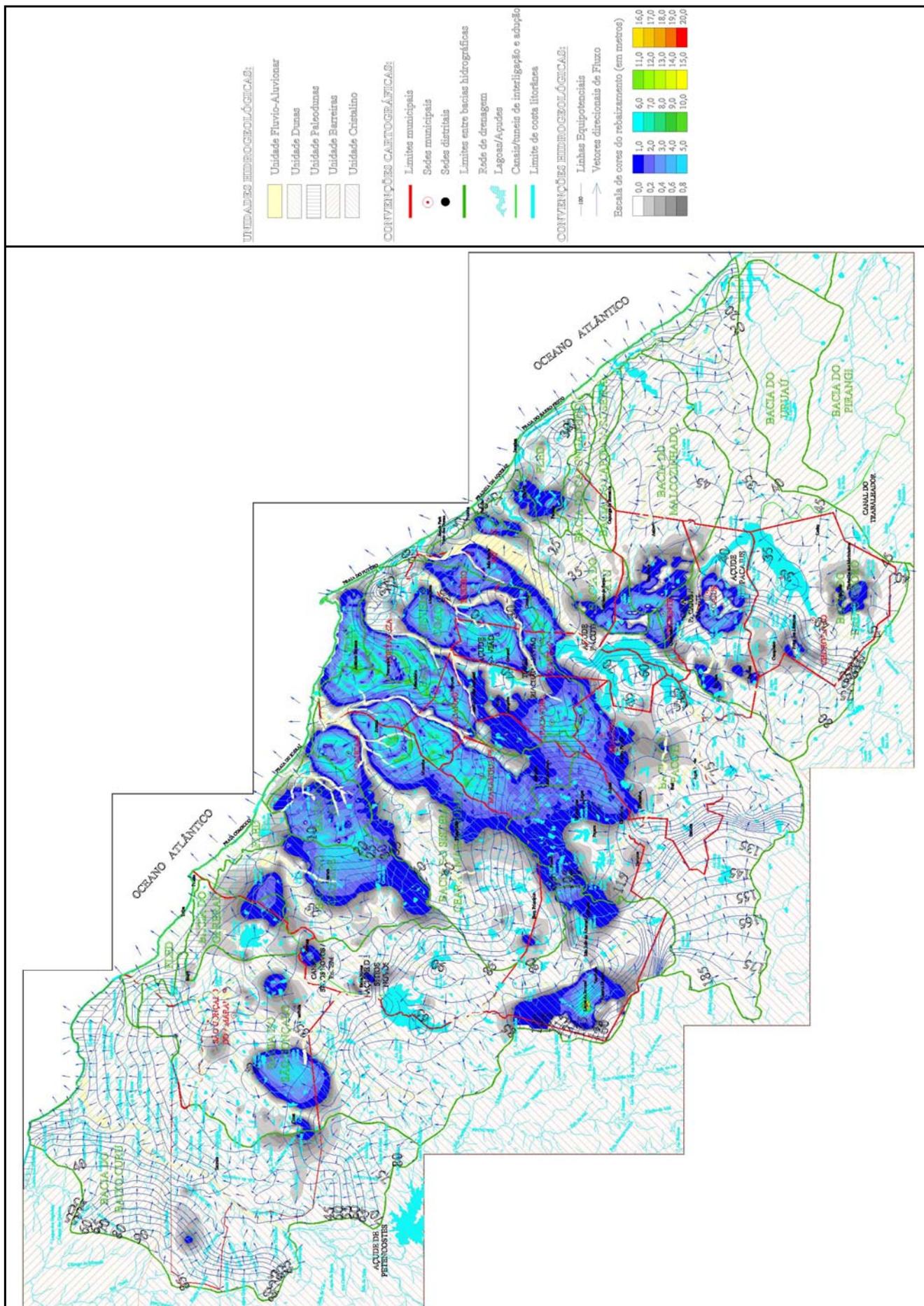
Para a caracterização dos aspectos hidrogeológicos relacionados às unidades identificadas **RMF**, considera-se a integração dos resultados apresentados na calibração dos 4 domínios de modelamento, conforme representado na Figura 10. Esta figura mostra a distribuição das linhas equipotenciais, dos vetores direcionais de fluxo das águas subterrâneas e a conformação da superfície de rebaixamento provocada pelo bombeamento dos poços em operação na **RMF**.

Em se tratando da dinâmica das águas subterrâneas, observa-se, pela Figura 10, que o fluxo se dá, preferencialmente, a partir das zonas de cotas mais elevadas para as zonas de cotas mais baixas, representadas pelos leitos dos principais cursos d'água (*e.g.* rios Curú, São Gonçalo, Gereraú, Cauhipe, Pacoti, Ceará, Maranguape, Cocó, Coaçu, Choró, Catú, Caponga Funda, Caponga Roseira e Malcozinhado) e por toda a zona litorânea da **RMF**, e, daí, em direção ao mar.

Sendo assim, constata-se que o escoamento subterrâneo é fortemente influenciado pela rede drenagem superficial. Por outro lado, os poços de bombeamento também exercem uma forte influência na distribuição das cargas hidráulicas, alterando significativamente as direções de fluxo e, conseqüentemente, o escoamento das águas subterrâneas. Neste contexto, destaca-se a faixa litorânea dos municípios de Fortaleza e Aquiraz (Figura 10), onde a alteração das direções de fluxo e das linhas equipotenciais são mais expressivas, em função dos rebaixamentos.

Tais rebaixamentos são provocados pela operação dos 8.888 poços em operação na **RMF**, comprometendo, significativamente, as disponibilidades hídricas subterrâneas nos municípios de Fortaleza, Caucaia, Maracanaú, Maranguape, Pacatuba, Itaitinga, Eusébio, Aquiraz, Horizonte e Pacajus, em função da elevada densidade de poços. Notadamente, os rebaixamentos são menos expressivos nos municípios de São Gonçalo do Amarante, Guaiúba e Chorozinho, localizados predominantemente nos domínios de rochas cristalinas, onde a densidade de poços é menor devido à baixa produção e à presença de águas subterrâneas com qualidade inferior.

No geral, os resultados das simulações mostraram que os rebaixamentos médios na **RMF** podem atingir até 20 m de profundidade (Figura 10). Além disso, os resultados mostraram também que a operação dos poços é capaz de produzir cerca de 79,79 milhões de m<sup>3</sup>/ano (TAB. 8). Neste contexto, os poços instalados na Unidade Barreiras respondem pela maior produção de águas subterrâneas, da ordem de 37,05 milhões de m<sup>3</sup>/ano. Em seguida, destaca-se a Unidade Cristalino, que em função de sua vasta área e da pequena densidade de poços, produz cerca de 17,97 milhões de m<sup>3</sup>/ano. Nas unidades Dunas e Paleodunas os poços instalados produzem, respectivamente, 12,83 e 11,94 milhões de m<sup>3</sup>/ano de águas subterrâneas. Adicionalmente, as simulações sugerem que na Unidade Dunas cerca de 15,88 milhões de m<sup>3</sup>/ano de águas subterrâneas sejam produzidas em função da intrusão da cunha salina. Portanto, somando os valores apresentados para a Unidade Dunas, na verdade, a vazão produzida seria da ordem de 28,71 milhões de m<sup>3</sup>/ano (TAB. 8).



**Figura 10** - Caracterização da dinâmica de fluxo das águas subterrâneas e dos rebaixamentos provocados pelos poços em operação na RMF. (Fonte: compilado de Fernandes, 2005).

Por outro lado, somando toda a contribuição do bombeamento o total de água subterrânea produzida pelos poços seria da ordem de 95,67 milhões de m<sup>3</sup>/ano. Isto corrobora os dados iniciais apresentados por COGERH (2001) e Golder/Pivot (2005) que previu uma produção equivalente a cerca de 93,0 milhões de m<sup>3</sup>/ano.

**Tabela 8** - Reservas renováveis das unidades aquíferas e produção dos poços em todo o domínio de influência hidrográfica da Região Metropolitana de Fortaleza

Unidade Aquífera	Área (km <sup>2</sup> )	Nº de Poços Np	Densidade de Poços Np/km <sup>2</sup>	Reserva Renovável x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /ano	Produção dos Poços x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /ano	Percentual Comprometido	Percentual Disponível	Importação de Água do Mar x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /ano
Cristalino	4.158,0	2.229	0,54	71,43	17,97	25,2%	74,8%	0,00
Barreiras	2.703,6	4.947	1,83	222,18	37,05	16,7%	83,3%	0,00
Paleodunas	283,0	2.987	10,55	26,54	11,94	45,0%	55,0%	0,00
Dunas	285,0	2.547	8,94	30,66	12,83	41,8%	58,2%	15,88
<b>TOTAL</b>	<b>7.429,6</b>	<b>12.710</b>	<b>1,71</b>	<b>350,82</b>	<b>79,79</b>	<b>22,7%</b>	<b>77,3%</b>	<b>15,88</b>

*Nota: dados do modelo computacional.*

Já a reserva renovável total calculada pelo modelo indica um valor da ordem de 350,82 milhões de m<sup>3</sup>/ano (TAB. 8). Considerando individualmente as unidades aquíferas Cristalino, Barreiras, Paleodunas e Dunas, estas reservas são, respectivamente, da ordem de 71,43; 222,18; 26,54; e, 30,66 milhões de m<sup>3</sup>/ano.

Pela referida tabela, pode-se observar também que os percentuais relativos das vazões extraídas pelos poços correspondem a valores consideráveis para todas as unidades aquíferas, mostrando que cerca de 22,7% das reservas hídricas renováveis encontram-se comprometidas anualmente com a operação dos poços.

Sob esta perspectiva, as unidades Paleodunas e Dunas mostraram-se ser as mais solicitadas, indicando que, respectivamente, cerca de 45,0% e 41,8% de suas reservas renováveis são utilizadas anualmente. Na seqüência, aparecem as unidades Cristalino e Barreiras, indicando, respectivamente, que cerca de 25,20% e 16,7% de suas reservas são exploradas anualmente.

## CONCLUSÕES

As conclusões deste trabalho referem-se aos objetivos propostos inicialmente. Sendo assim, no tocante à concepção do modelo hidrogeológico conceitual os resultados obtidos permitem concluir o seguinte:

- o domínio de interesse definido no modelo hidrogeológico conceitual é representado pelos contornos hidrográficos das bacias que circunscrevem os limites geopolíticos dos municípios integrantes da **RMF**;
- as unidades hidrogeológicas adotadas na concepção do modelo conceitual correspondem àquelas unidades litoestratigráficas que foram reconhecidas na área; e,
- os valores de condutividade hidráulica das unidades hidrogeológicas foram obtidos através

de testes de bombeamento e também pela compilação de dados da literatura.

No que se refere ao modelo hidrogeológico computacional os resultados obtidos com as simulações mostraram que:

- as calibrações foram consideradas satisfatórias para todos os domínios de modelamento propostos, com erros médios situados entre -0,08 e +0,96 m;
- o fluxo das águas subterrâneas se dá, preferencialmente, a partir das zonas de cotas mais elevadas para as zonas de cotas mais baixas, representadas pelos leitos dos principais cursos d'água e por toda a zona litorânea da **RMF**, e, daí, em direção ao mar;
- os rebaixamentos médios na **RMF** podem atingir até 20 m de profundidade. Notadamente, os rebaixamentos são menos expressivos nos municípios localizados predominantemente nos domínios de rochas cristalinas, onde a densidade de poços é menor devido à baixa produção e à presença de águas subterrâneas com qualidade inferior;
- a operação dos poços é capaz de produzir cerca de 79,79 milhões de m<sup>3</sup>/ano. Os poços instalados na Unidade Barreiras respondem por uma produção da ordem de 37,05 milhões de m<sup>3</sup>/ano. Em seguida, destaca-se a Unidade Cristalino, que produz cerca de 17,97 milhões de m<sup>3</sup>/ano. Nas unidades Dunas e Paleodunas os poços instalados produzem, respectivamente, 12,83 e 11,94 milhões de m<sup>3</sup>/ano de águas subterrâneas;
- na Unidade Dunas cerca de 15,88 milhões de m<sup>3</sup>/ano de águas subterrâneas são produzidas em função da intrusão da cunha salina. Portanto, somando os valores apresentados para a Unidade Dunas, a vazão produzida seria da ordem de 28,71 milhões de m<sup>3</sup>/ano;
- a operação dos poços é capaz de produzir cerca de 95,67 milhões de m<sup>3</sup>/ano, sendo 79,79 milhões de m<sup>3</sup>/ano de águas doces e 15,88 milhões de m<sup>3</sup>/ano de águas provenientes da intrusão da cunha salina;
- a reserva renovável total calculada pelo modelo indicou um valor da ordem de 350,82 milhões de m<sup>3</sup>/ano. Considerando individualmente as unidades aquíferas Cristalino, Barreiras, Paleodunas e Dunas, estas reservas são, respectivamente, da ordem de 71,43; 222,18; 26,54; e, 30,66 milhões de m<sup>3</sup>/ano;
- os percentuais relativos das vazões extraídas pelos poços correspondem a valores consideráveis para todas as unidades aquíferas, mostrando que 22,7% das reservas hídricas renováveis encontram-se comprometidas anualmente com a operação dos poços; e,
- as unidades Paleodunas e Dunas mostraram-se ser as mais solicitadas pelo bombeamento, indicando que, respectivamente, cerca de 45,0% e 41,8% de suas reservas renováveis são utilizadas anualmente. Na seqüência, aparecem as unidades Cristalino e Barreiras, indicando, respectivamente, que cerca de 25,2% e 16,7% de suas reservas são exploradas anualmente.

## AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho manifestam os seus agradecimentos à FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais), pela bolsa de doutoramento concedida ao aluno do Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Escola de Engenharia da UFMG, como também à GOLDER ASSOCIATES BRASIL LTDA., pelo apoio técnico e financeiro concedido para a realização deste estudo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bianchi, L.; Padilha, M. W. M. & Teixeira, J. E. M. 1984. Recursos de água subterrânea na R.M.F. Fatores Condicionantes. In: Plano de aproveitamento dos Recursos Hídricos na R.M.F. – Fase I. Fortaleza. SEPLAN – AUMEF, v.1, 139 p.
- Braga, A. P. G.; Passos, C. A. B.; Souza, E. M.; França, J.B.; Medeiros, M.F.; Andrade, V.A. 1981. Geologia da região nordeste do Estado do Ceará – Projeto Fortaleza. Série Geológica 12, Seção Geológica Básica 9, Brasília. MME/DNPM, 123 p.
- Brandão, R. L. 1995. Mapa geológico da Região Metropolitana de Fortaleza. Texto explicativo. Escala 1:100.000. Projeto SINFOR. CPRM/REFO. Fortaleza, CE. 32 p.
- Campos, L. A. S. & Menezes, M. A. S. 1982. Pesquisa e aproveitamento de água subterrânea para abastecimento urbano nas dunas costeiras do Ceará. II congresso Bras. de Águas Subterrâneas. ABAS. ANAIS. Salvador - BA. p. 29-42.
- Cavalcante, I. N. 1998. Fundamentos Hidrogeológicos para a Gestão Integrada de Recursos Hídricos na Região Metropolitana de Fortaleza, Estado do Ceará. São Paulo: Instituto de Geociências da USP. 156p. (Tese, Doutorado em Hidrogeologia).
- Cavalcante, I. N.; Veríssimo, L. S. & Rebouças, A. C. 2000. Aspectos qualitativos das águas subterrâneas na Região Metropolitana de Fortaleza. X Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. ANAIS. ABAS. Salvador – BA. 11p.
- Ceará. 1992. Plano Estadual de Recursos Hídricos. Fortaleza, CE (4V).
- COGERH – Companhia de Gerenciamento dos Recursos Hídricos do Ceará. 2001. Plano de gerenciamento de águas das bacias metropolitanas. Fortaleza-CE. (cd-texto).
- CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. 1998. Programa Recenseamento de Fontes de Abastecimento por Água Subterrânea no Estado do Ceará. CPRM/CE – Diretoria de Hidrologia e Gestão Territorial.
- CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. 1999. Atlas dos Recursos Hídricos Subterrâneos do Ceará: Programa Recenseamento de Fontes de Abastecimento por Água Subterrâneas no Estado do Ceará. Edição em CD ROM. Fortaleza.
- CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. 2000. Programa de Água Subterrânea para

- o Semi-Árido Brasileiro. CPRM/CE – Diretoria de Hidrologia e Gestão Territorial, 36p.
- Fernandes, R. A. 2005. *Gestão Integrada de Águas Subterrâneas: Critérios Gerais Orientadores para Definição e Caracterização de Áreas Estratégicas de Abastecimento*. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Tese de Doutorado, 494p.
- Freeze, R. A. & Cherry, J. A. 1979. *Groundwater*. Prentice Hall, Inc. Engewood Cliffs.
- Golder/Pivot. 2005. Sistema de Monitoramento/Gestão de Água Subterrânea de Micro-Áreas Estratégicas da Região Metropolitana de Fortaleza. Relatório Final do Projeto. VII Volumes.
- Guiguer, N. & Thomas, F. 1998. *Visual MODFLOW*. Waterloo Hydrogeologic, Inc., Waterloo, Canada.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2000. Censo demográfico 2000. Rio de Janeiro.
- Iplance – Fundação Instituto de Planejamento do Ceará. 1997. Atlas do Ceará. Governo do Estado do Ceará. Secretária do Planejamento e Coordenação – SEPLAN. 65 p.
- Ribeiro, J. A. P.; Colares, J. Q. S.; Cavalcante, V. M. M. & Sena, R. B. 1997. Mapa Geológico da Região Metropolitana de Fortaleza. Escala 1:100.000 – DNPM/CPRM. Fortaleza - CE.